



# Ús de dades de teledetecció per a la definició i mapificació de tipologies de regeneració en zones afectades per grans incendis forestals

*L'ús combinat de dades LiDAR i NDVI permet avaluar de manera continua la regeneració postincendi, generant informació valuosa per a la planificació i la gestió d'aquests espais forestals.*

En la conca mediterrània els grans incendis forestals representen un paper clau com a moduladors del paisatge, causant canvis importants en la vegetació i, de vegades, importants pèrdues econòmiques i mediambientals. Els efectes dels incendis forestals són particularment importants quan afecten masses sotmeses a alta recurrència d'incendis, o dominades per espècies que no presenten mecanismes efectius de regeneració postpertorbació, com és el cas d'alguns pins submediterranis (com la pinassa o el pi roig). En aquests casos, l'incendi pot provocar canvis sobtats de vegetació cap a comunitats arbrades més resilents als focs de capçada (frondoses rebrotadores, principalment quercínies), o bé cap a comunitats no arbrades, donant lloc a formacions arbustives, herbassars o cobertures escasses de vegetació.

La planificació de la gestió d'aquestes grans superfícies en regeneració requereix, de vegades, de l'aplicació d'accions a curt termini (mesures de restauració d'urgència, principalment per a prevenir fenòmens erosius) i d'altres a mitjà/llarg termini, dirigides a promoure el desenvolupament de la regeneració mitjançant l'aplicació de diferents tractaments silvícoles. Per tal de planificar aquesta gestió adequadament, es fa necessari un bon coneixement de l'estat actual de la regeneració espontània de les

masses afectades, el qual és difícilment abordable des dels inventaris forestals tradicionals. Això és degut principalment a dos factors: la gran extensió que sovint presenten les zones afectades, i l'elevada dificultat que comporta la realització de parcel·les d'inventari en zones en fase avançada de regeneració.

En aquests casos, l'ús i anàlisi de dades de teledetecció pot representar una bona alternativa als inventaris clàssics. En l'actualitat, Catalunya disposa de dades LiDAR de baixa resolució (mitja de 0,5 polsos·m<sup>-2</sup>) de tot el territori, gràcies al programa LiDARCAT de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), i de vols fotogramètrics anuals d'alta resolució (25 cm), dels quals poden derivar-se índexs de vegetació com el NDVI (Índex de Vegetació de Diferència Normalitzada). Les dades LiDAR són d'utilitat per descriure l'estructura de la vegetació (alçades i cobertures), mentre que les dades NDVI poden utilitzar-se, en alguns casos, per diferenciar espècies o grups d'aquestes.

En aquest article presentem els principals resultats d'un treball dut a terme amb l'objectiu d'analitzar la validesa d'aquestes fonts de dades per a la caracterització de la regeneració postincendi en una zona afectada pel gran incendi del 1998 de la Catalunya Central (Figura 1). Aquest incendi va afectar principalment

bosc dominats per la pinassa, i en menor mesura pel pi blanc, el roure de fulla petita, l'alzina i el pi roig. El treball es va realitzar en el marc del projecte RESILFOR (AGL2012-40039-C02-01, finançat pel Ministeri d'Economia i Competitivitat) i d'un conveni de col·laboració entre el Centre Tecnològic Forestal de Catalunya i l'ICGC per a aquesta finalitat.

«Les dades de sensors remots ens permeten realitzar caracteritzacions contínues de la regeneració postincendi a un cost molt inferior al dels inventaris forestals tradicionals».

## Obtenció de les tipologies de regeneració postincendi i del model de classificació

L'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya va realitzar el tractament de les dades LiDAR (procedents d'un vol de l'estiu 2009) mitjançant el programa FUSION (McGaughey and Carson, 2003). En aquest procés es va obtenir un conjunt de mètriques referides a parcel·les de 10x10 metres (tota l'àrea va ser dividida en parcel·les d'aquesta mida), que incloïen diferents estadístics (percentils, mitjana, moda, desviació estàndard, etc.) referits a les distribucions d'alçades i d'intensitats (prèviament normalitzades) de les dades LiDAR,

Els mateixos estadístics es van obtenir en relació als valors de NDVI de cada parcel·la, que varen calcular-se a partir de les imatges procedents d'un vol fotogramètric que tingué lloc la primavera de 2011.

Posteriorment, es va realitzar un mostreig aleatori estratificat en funció de l'alçada mitjana obtinguda amb les dades LiDAR i de la distància a les pinedes no cremades amb l'objectiu de seleccionar un conjunt de parcel·les representatives del total d'estructures i composicions (dominància de pi o frondoses) presents en la zona afectada. En cadascuna de les parcel·les seleccionades (44 en total, de 10x10 m), es van estimar les cobertures del sòl per diferents estrats (sòl nu o vegetació no llenyosa, vegetació arbustiva baixa i alta, i regeneració arbòria) i les alçades mitjanes de la regeneració de pi i de frondoses. Les dades de camp varen utilitzar-se per realitzar una classificació no supervisada de les parcel·les mitjançant el mètode Ward d'aglomeració jeràrquica (Ward, 1963), a partir de la qual varen obtenir-se un total de 5 tipologies ben diferenciades (Taula 1, Figura 2).

Un cop definides les tipologies de regeneració postincendi es va utilitzar una tècnica de classificació supervisada denominada Random Forest (Breiman, 2001) per tal de generar el model de més precisió que classifiqués les 44 parcel·les mesurades

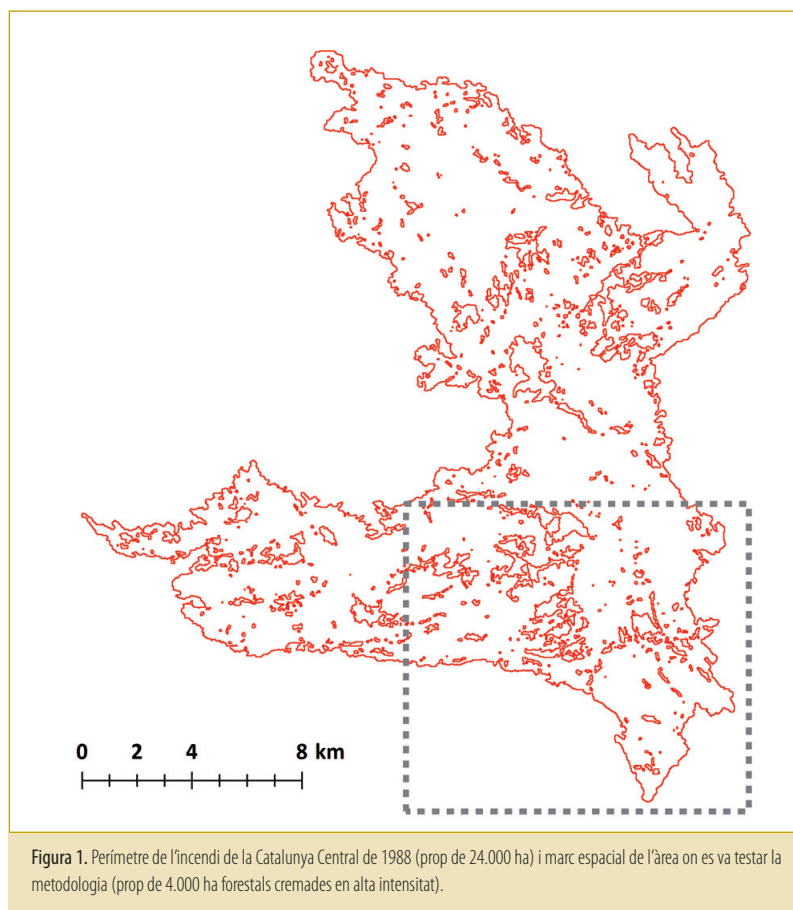


Figura 1. Perímetre de l'incendi de la Catalunya Central de 1988 (prop de 24.000 ha) i marc espacial de l'àrea on es va testar la metodologia (prop de 4.000 ha forestals cremades en alta intensitat).

a camp en la seva tipologia corresponent, a partir dels valors de les mètriques de LiDAR i NDVI obtingudes en cadascuna d'elles. El model de classificació finalment seleccionat va classificar adequadament les parcel·les de camp amb més d'un 80% de precisió, i utilitzant només sis variables: 4 mètriques relatives a les alçades de LiDAR, i 2 mètriques relatives als valors NDVI.

«Un nombre reduït de parcel·les d'inventari permeten generar tant les tipologies com el model amb el qual classifiquem tota l'àrea afectada».

Taula 1. Estadístics descriptius (mitjana i desviació estàndard) de les principals variables mesurades a camp per a cadascuna de les tipologies de regeneració postincendi obtingudes.

Tipus	n	Percentatges de cobertura (%)					Alçades mitjanes (cm)		Descripció sintètica
		Sòl	Arbust. baixa	Arbust. alta	Total arbori	Pins	Frondoses	Pins	
1	5	54.11 (10.21)	39.11 (10.91)	3.21 (1.21)	3.61 (5.31)	0.41 (0.31)	84.31 (111.61)	55.91 (62.71)	Escassa cobertura de vegetació llenyosa
2	5	28.71 (5.01)	39.91 (18.51)	24.41 (19.21)	7.01 (4.51)	1.91 (2.71)	125.61 (116.71)	130.91 (125.91)	Dominància d'arbustives, amb regeneració arbòria esporàdica
3	11	26.61 (6.61)	28.41 (11.11)	10.11 (7.31)	34.91 (7.81)	7.71 (7.81)	272.41 (104.31)	122.61 (71.01)	Cobertura arbòria baixa o moderada dominada per frondoses
4	10	14.81 (6.11)	17.41 (6.51)	14.71 (13.31)	53.11 (9.51)	6.61 (6.81)	361.61 (67.91)	119.81 (60.41)	Alta cobertura arbòria dominada per frondoses
5	13	13.71 (5.81)	20.91 (14.31)	8.51 (9.51)	57.01 (17.31)	45.41 (16.51)	215.51 (145.51)	206.11 (53.61)	Alta cobertura arbòria dominada per pins

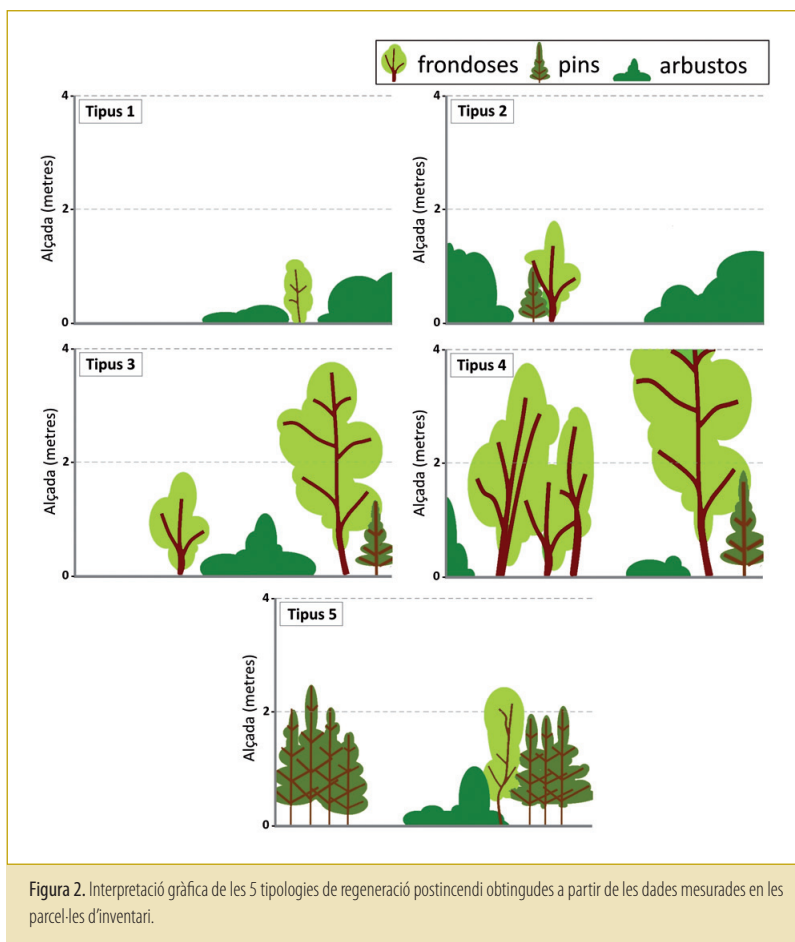


Figura 2. Interpretació gràfica de les 5 tipologies de regeneració postincendi obtingudes a partir de les dades mesurades en les parcel·les d'inventari.

## Classificació de la regeneració després del gran incendi del 1998 i validació

Els valors de les 6 variables de LiDAR i NDVI que havien estat seleccionades en el pas anterior van utilitzar-se per estendre la classificació tipològica obtinguda a la resta de parcel·les de 10x10 m del conjunt de l'àrea forestal afectada (3.200 ha en total). El resultat d'aquest procediment va mostrar com prop de la meitat de l'àrea analitzada (42,6%) presentava una alta cobertura arbòria dominada per frondoses (Tipus 4). Així mateix, al voltant del 17% de la superfície va ser classificat com a Tipus 3 (domini de regeneració de frondoses amb una cobertura entre baixa i moderada) i un 11% com a Tipus 5 (regeneració de pi en cobertura moderada o alta). La resta de superfície presentava una presència escassa (o nul·la) de regeneració arbòria, amb dominància

d'arbustos en el 20,4% (Tipus 2), o bé dominància de vegetació no llenyosa i/o sòl nu en el 9,3% (Tipus 1).

Els resultats obtinguts confirmen els processos de substitució de la pineda de pinassa per roures de rebrot que caracteritzen la zona afectada i que han estat descrits en diverses publicacions (Rodrigo *et al.*, 2004; Puerta-Piñero *et al.*, 2012). A més, evidencien l'existència d'una superfície considerable (vora el 30% de l'àrea objecte d'estudi) amb molt escassa o nul·la regeneració d'espècies arbòries, un terç de la qual es podria considerar en risc elevat d'erosió a causa de la baixa cobertura de vegetació llenyosa. Finalment, l'estudi mostra regeneració abundant de pins (majoritàriament pinassa o pi blanc, i en casos esporàdics, pi roig) en diferents zones de reduïda extensió. No obstant això, cal tenir en compte a l'hora d'interpretar els resultats relatius a la presència de pins en la zona cremada que el nivell de detall

d'aquest treball només permet identificar adequadament la regeneració dels pins quan aquests apareixen en cobertures moderades o altes (Tipus 5), però no quan apareixen en cobertures baixes ja sigui en parcel·les dominades pels roures (Tipus 3 i 4) o per la vegetació arbustiva (Tipus 2). Per tant, els resultats del nostre treball tendeixen a subestimar la presència de pi.

Per tal d'avaluar la precisió del model d'assignacions tipològiques, es va realitzar una validació visual a camp. La validació va consistir en la visita d'un total de 75 punts (15 punts corresponents a cadascuna de les 5 tipologies) per part d'un expert independent. Aquest expert va assignar, a cada punt visitat, una de les 5 tipologies de regeneració (en funció de les seves característiques estructurals i de composició) i el resultat de la seva assignació va comparar-se amb la classificació obtinguda mitjançant el model.

«Els resultats confirmaren els importants processos de substitució de la pineda de pinassa per roures de rebrot».

Aquest procés de validació va mostrar que el model classificava correctament entre el 74% i el 91% dels punts (segons les tipologies). En els casos en els quals es produïren errors de classificació, aquests es donaren entre tipologies molt properes (principalment entre els tipus 2 i 3, i entre els tipus 3 i 4).

Potencialitat d'aquest tipus de dades per a l'inventari de grans superfícies en regeneració i aspectes a considerar en la seua aplicació a altres zones.

Aquest treball mostra la potencialitat que presenten les eines de teledetecció (en aquest cas, dades LiDAR

i índexs de vegetació derivats de fotografies procedents de vols fotogramètrics) per inventariar grans zones afectades per perturbacions com els grans incendis forestals. Les dades LiDAR de les quals disposàvem eren de baixa resolució i per tant no permetien identificar correctament arbres individuals, per la qual cosa es va decidir treballar a nivell de parcel·la i de comunitats o tipologies de regeneració. Tot i que cada vegada hi ha més disponibilitat de dades de teledetecció, tant a nivell regional com nacional, el nombre d'anys pels quals es disposa d'aquest tipus d'informació és encara limitat. Per aquest i altres factors, abans d'aplicar aquesta metodologia a altres grans incendis, cal tenir en compte les consideracions següents:

- És important que tant les dades LiDAR com les imatges multiespectrals hagin estat capturades en un període mínim de 10 anys després de l'incendi, per tal de permetre a la regeneració d'arribar a una certa alçada que faciliti la diferenciació de les tipologies de regeneració. En aquest sentit, en l'actualitat només es disposa d'un vol LiDAR per a tot Catalunya (capturat en el període 2008-2011) i per tant els incendis que han tingut lloc en la darrera dècada difícilment es podrien inventariar amb èxit amb aquesta metodologia.
- És necessari que tant els vols LiDAR com els vols fotogramètrics s'hagin efectuat en dates molt properes en tota l'àrea objecte d'estudi. Per exemple, tractar conjuntament dades de NDVI derivades de vols realitzats a la primavera i d'altres corresponents a vols de tardor donaria lloc a resultats difícilment interpretables.
- Les tipologies de regeneració postincendi seran quasi sempre diferents entre un incendi i un altre, ja que dependran fortament del tipus de vegetació abans de l'incendi, de les carac-

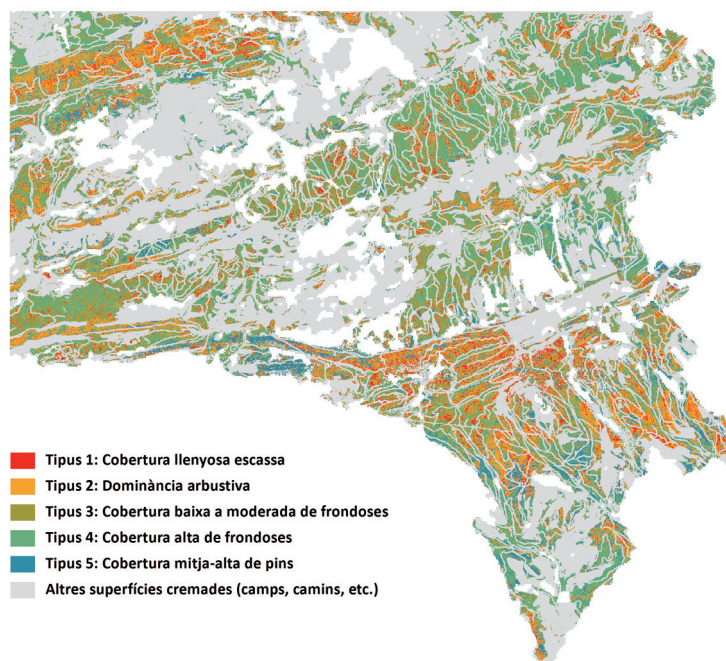


Figura 3. Mapa amb la distribució de les tipologies de regeneració a la porció de l'àrea afectada per l'incendi de 1998, analitzada en aquest treball.

terístiques particulars de cada zona, i dels objectius particulars del gestor a l'hora de diferenciar tipologies.

La cartografia de tipologies de regeneració postincendi generada en aquest treball presenta múltiples aplicacions en l'àmbit de la planificació i la gestió forestal. En aquest sentit, pot constituir, per exemple, una eina d'ajuda per a la rodalització de grans superfícies afectades en les quals s'hagin de realitzar Instruments d'Ordenació Forestal. A més, la cartografia generada permet identificar eficientment les zones que presenten riscos erosius elevats,

o zones sense regeneració d'espècies arbòries en què, eventualment, es podrien dur a terme accions de restauració. De la mateixa manera, permet identificar amb precisió totes les zones amb elevada cobertura d'espècies rebrotadores (principalment roures) i identificar aquelles que es troben, actualment, en un període idoni per a la realització d'actuacions de millora.

«Malgrat els bons resultats, hi ha encara alguns condicionants que limiten l'aplicació d'aquesta metodologia a tot el territori».

### Agraïments

Els autors volen agrair especialment als tècnics de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya la cessió i el tractament de les dades de teledetecció. Particularment, a la Mariló Cabré, l'Ariadna Just i el Toni Magariños. A més, s'agraeix al Vicent Vidal, el Sergio Martínez i l'Assu Gil la seva participació en la recollida de dades de camp.





## Referències

BREIMAN, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning* (45), 5-32.

MCGAUGHEY, R.J., CARSON, W.W. (2003). «Fusing LIDAR data, photographs, and other data using 2D and 3D visualization techniques». In: *Sensing, A.S.f.P.a.R. (Ed.), Terrain Data: Applications and Visualization - Making the Connection*, Charleston, South Carolina (pp. 16-24).

PUERTA-PIÑERO, C., ESPELTA, J.M., SÁNCHEZ-HUMANES, B., RODRIGO, A., COLL, L., BROTONS, L. (2012). «History matters: previous land use changes determine post-fire vegetation recovery in forested Mediterranean landscapes». *Forest. Ecol. Manag.* 279 (pp. 121-127).

RODRIGO, A., RETANA, J., PICÓ, F.X. (2004). «Direct regeneration is not the only response of Mediterranean forests to large fires». *Ecology* 85 (pp. 716-729).

WARD, J.H., JR. (1963). «Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function». *J. Am. Statist. Assoc.* (pp. 236-244).



Santiago Martín  
Enginyer de Forests  
Investigador predoctoral  
Centre Tecnològic Forestal  
de Catalunya



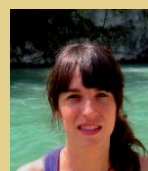
Lluís Coll  
Doctor Enginyer de Forests  
Investigador al Centre  
Tecnològic Forestal de  
Catalunya



José Ramón González  
Doctor Enginyer de Forests  
Investigador al Centre  
Tecnològic Forestal de  
Catalunya



Miquel de Cáceres  
Doctor en Biologia  
Investigador al Centre  
Tecnològic Forestal de  
Catalunya



Lúdia Guitart  
Enginyera de Forests  
Tècnic  
Associació de Propietaris  
del Montnegre i el Corredor

## HUMOR

